

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ

Трудности математического моделирования нелинейных процессов, наблюдающихся в гидродинамических системах, определяют целесообразность применения метода лабораторного моделирования, который в ряде случаев позволяет получить физически ясную картину явления на различных стадиях его развития, а также выявить ряд особенностей, не улавливаемых при теоретических рассуждениях. Первые эксперименты по изучению неустойчивости свободных слоев сдвига были проведены в [1], продолжены и рассмотрены с позиций линейной теории в [2]. В контексте геофизических приложений исследование течений со сдвигом осуществлялось в [3-6]. Представляемая работа была направлена на изучение неустойчивости свободного сдвигового слоя вращающейся баротропной жидкости при высоких числах Рейнольдса ($Re \sim 10^4 - 10^5$).

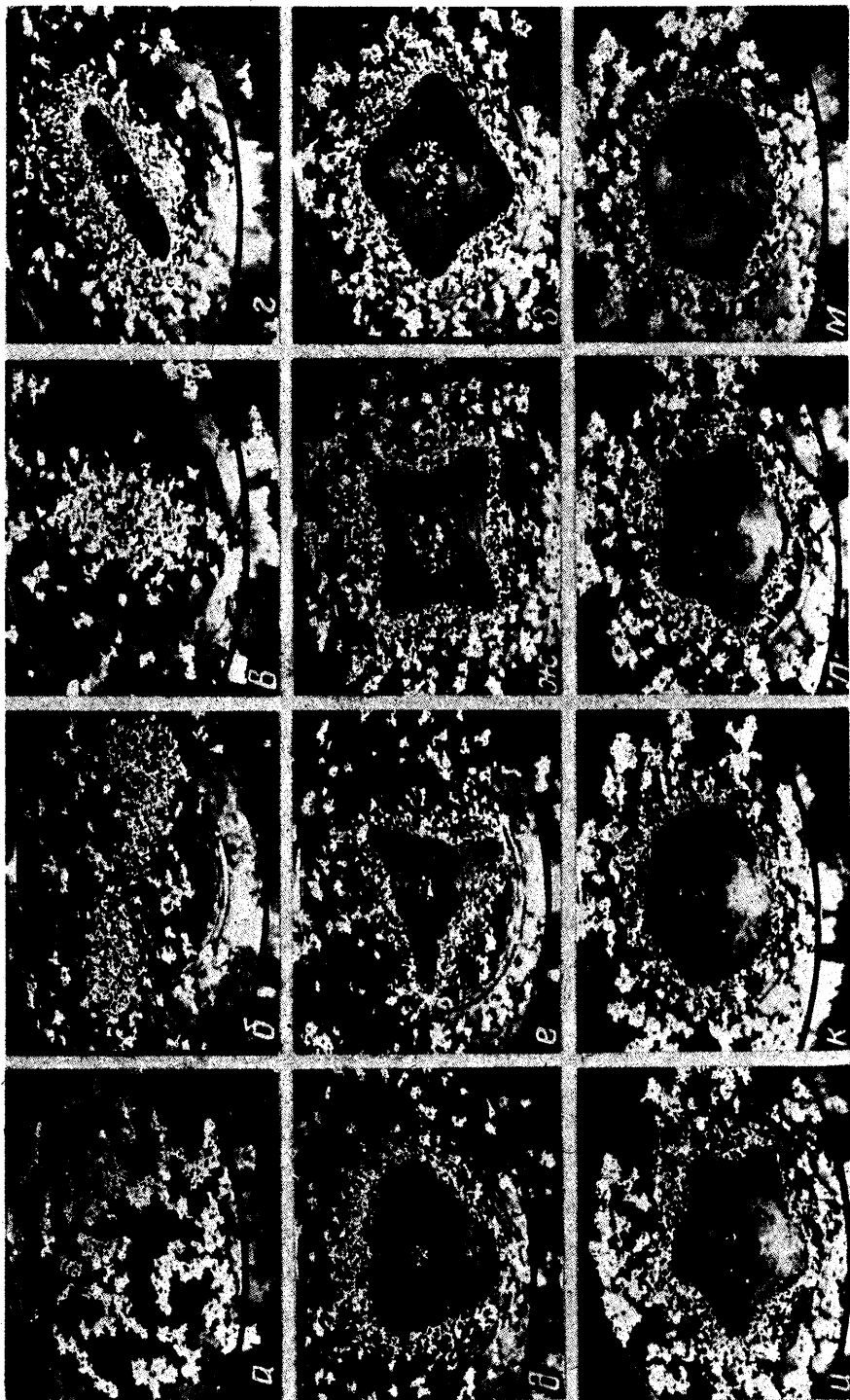
Эксперименты проводились на установке, описанной в работах [7, 8]. Она представляла собой цилиндрический сосуд, заполнявшийся жидкостью, плоское дно которого было составлено из центрального диска радиусом 0,1 м и двух концентрических колец шириной 0,1 и 0,03 м соответственно. Общий диаметр сосуда составлял 0,46 м. Кольца и диск устанавливались на верхних концах полых валов, объединенных в один телескопический вал. Снизу на каждый вал монтировались шкивы, на которые посредством клиноремной передачи и систем редукторов передавалось вращение двигателей. Частоты вращения секторов дна сосуда фиксировались датчиками, показания которых выводились на частотомер. С помощью плавной регулировки подачи напряжения на каждый из трех двигателей варьировались скорости вращения диска и колец. К особенностям описанной системы относится возможность реализации независимых комбинаций скоростей вращения свободных сдвиговых потоков, отсутствие вынужденного радиального движения жидкости и общего вращения сосуда, характерных для известных моделей [4, 5].

Задавались следующие условия проведения эксперимента: центральный диск и кольца вращались против часовой стрелки (циклонически) с частотами $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ($5 \leq \omega_1 \leq 20$ рад/с; $1,5 \leq \omega_{2,3} \leq 4,5$ рад/с). Свободный сдвиговый слой формировался на радиусе центрального диска r_0 . Толщина h слоя жидкости (воды) составляла 2,5 см. Толщина экмановского пограничного слоя $(\nu/2\Omega)^{1/2} \sim (2-4) \cdot 10^{-2}$ ($\ll h$), где ν - коэффициент вязкости, принимавшийся равным 10^{-2} см²/с, Ω - частота среднего вращения. Внешними изменяемыми параметрами являлись интенсивности потоков и отлась двумя типами несмачиваемых частиц: частицами пенополиуретана размером порядка 200 мкм и частицами ликоподия размером порядка 20 мкм. Картины течения фиксировались кино- и фотосъемкой.

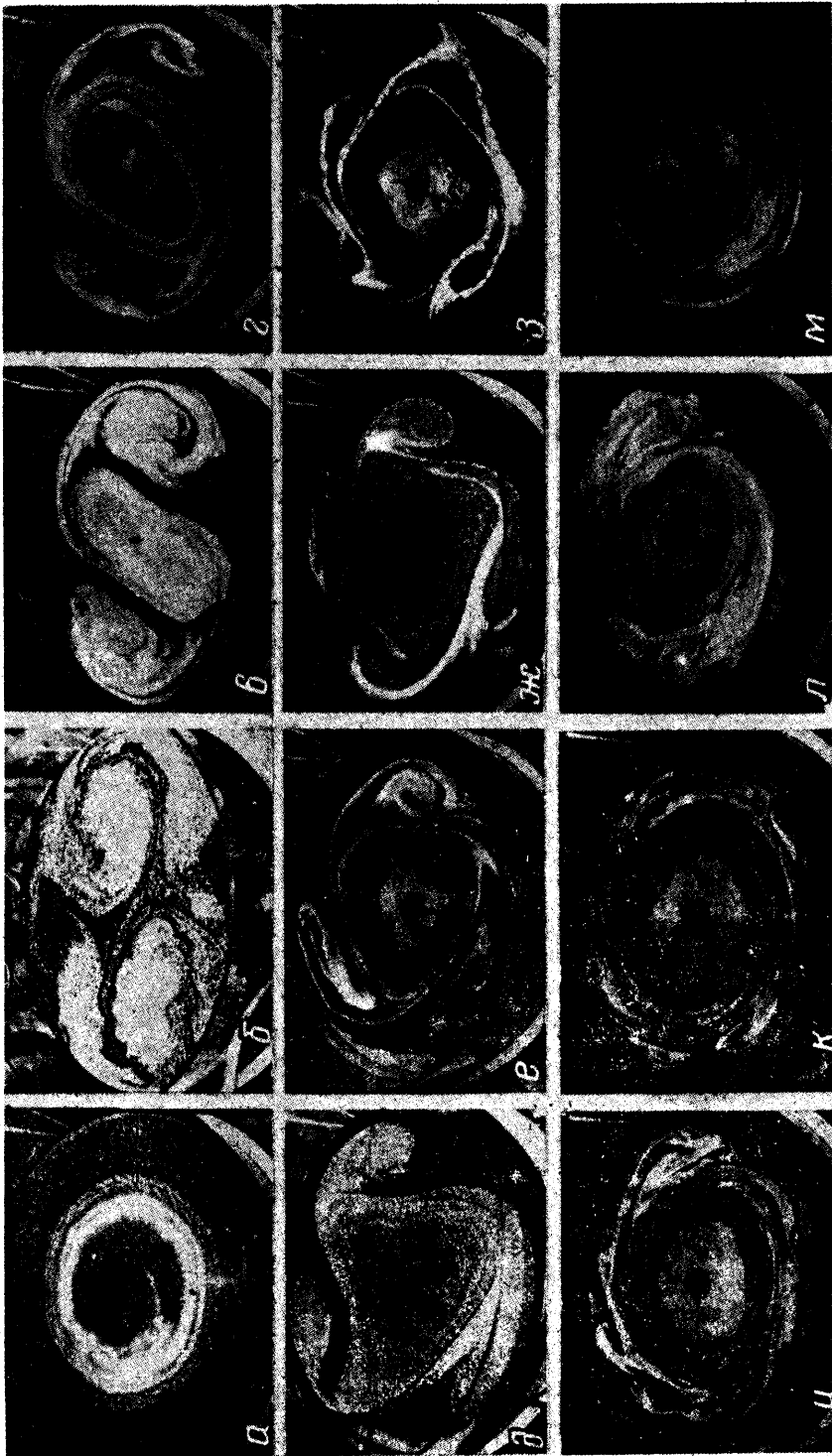
В результате потери устойчивости осесимметричного течения в зоне сдвига формировались стационарные цепочки крупномасштабных волн, характеризовавшиеся волновыми числами $n \leq 6$ (фиг. 1). Волновому числу, равному нулю, соответствовал режим концентрических кругов. Изменение внешних параметров приводило к возбуждению спиральной ($n=1$), эллипсоидальной ($n=2$), треугольной ($n=3$), четырех- ($n=4$), пяти- ($n=5$) и шестигульной ($n=6$) конфигураций течения. Каждый из наблюдавшихся режимов был устойчив при фиксированных частотах вращения секторов дна сосуда. Более тонкая визуализация поверхностных движений выявила существование регулярных систем вихрей антициклонического направления вращения в области внешних колец (фиг. 2). Число вихрей соответствовало волновому числу системы. Ранее формирование крупномасштабных вихревых структур наблюдалось в слоях смещения и затопленных струях [9, 10]. Отмечалось их устойчивое существование на фоне мелкомасштабной турбулентности, в качестве типичного механизма образования рассматривалось сворачивание сдвигового слоя [11].

Результаты, полученные в настоящей работе, дали еще один пример развития регулярных вихревых движений за счет собственной неустойчивости турбулентного сдвигового течения в отсутствие вынуждающих воздействий. Пространственный масштаб и степень организации упорядоченных вторичных движений определялись сдвиговыми характеристиками и параметрами вращения основных потоков. Введение красителя вдоль поверхностных спиральных линий тока показало, что вторичные структуры представляли лентообразные конфигурации, формировавшиеся по всей толще жидкости.

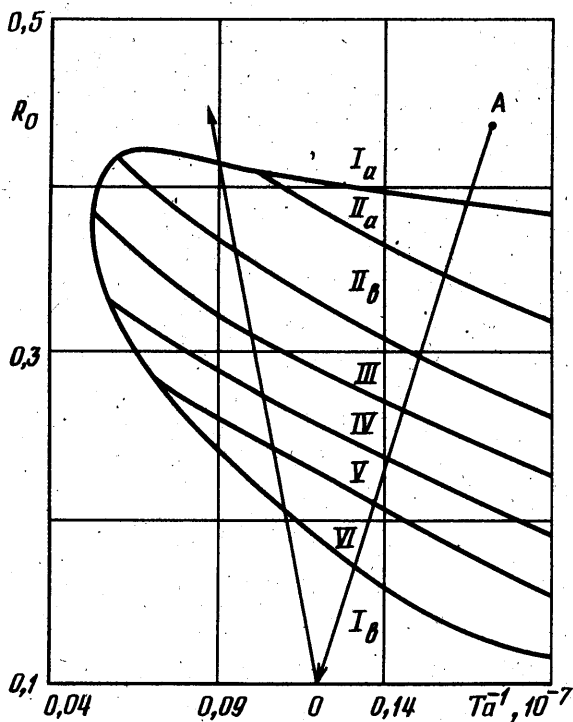
В качестве основных безразмерных параметров, характеризующих течение, использовались числа Россби $Ro = \nu/2\Omega L$ и Тейлора $Ta = 4h^2\Omega^2/\nu^2$, записанные соответственно: $Ro = (\omega_1 - \omega_{2,3})/2(\omega_1 + \omega_{2,3})$; $Ta = h^2(\omega_1 + \omega_{2,3})^2/\nu^2$. Здесь ν - характерная скорость; L, h - характерные горизонтальный и вертикальный масштабы. Число Россби



•Фиг. 1



Фиг. 2

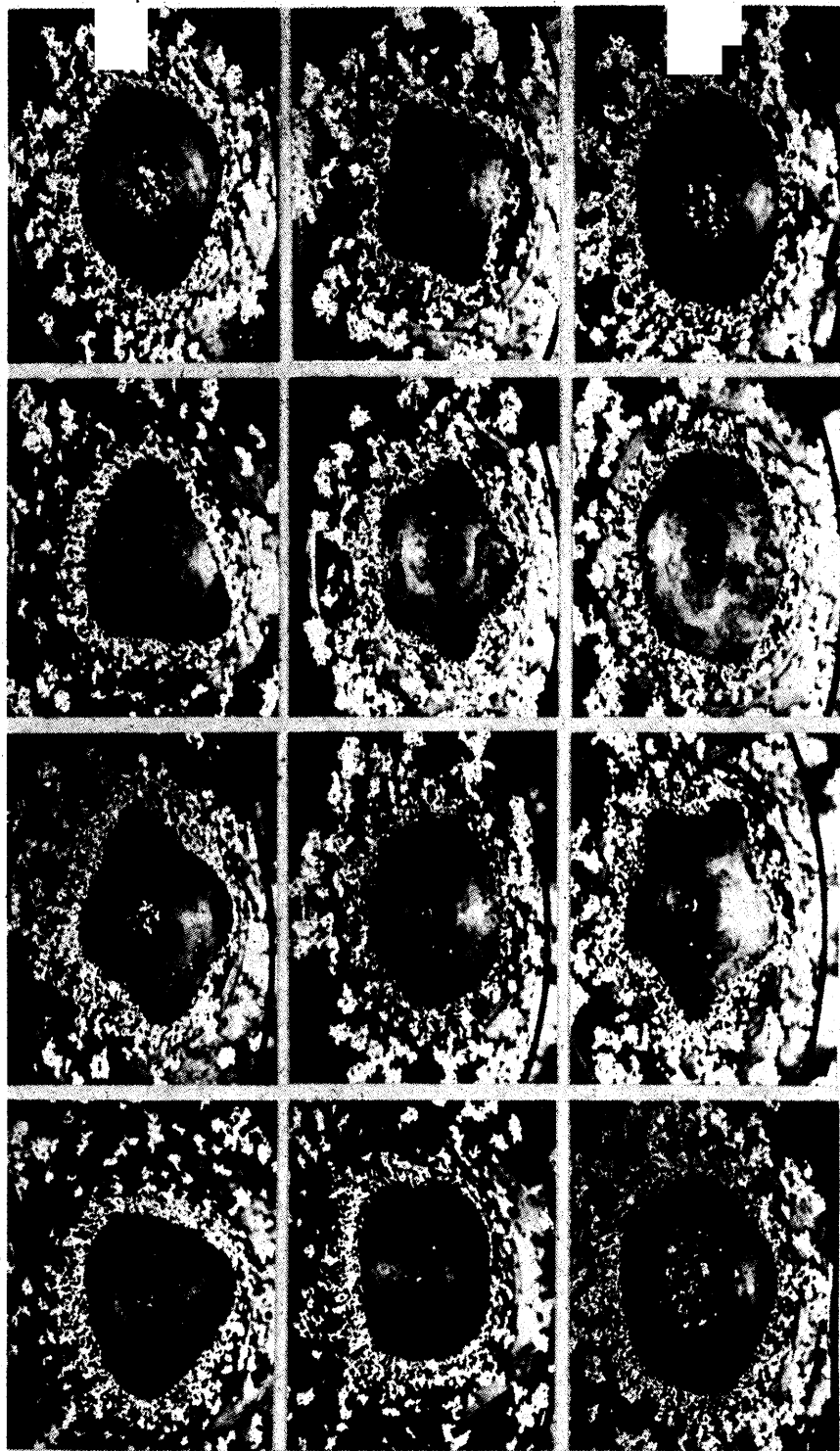


Фиг. 3

описывало относительный сдвиг скорости, Тейлора - интенсивность, среднего вращения потока. Число Рейнольдса $Re = \nu L / \nu = (L/h)^2 Ro Ta^{1/2}$ достигало значений $10^4 - 10^5$. В плоскости изменения параметров (Ta^{-1}, Ro) была построена экспериментальная диаграмма областей устойчивого существования режимов различных волновых чисел (фиг. 3). Зоны I_a, I_b соответствовали нижнему и верхнему осесимметричным течениям с круговыми линиями тока. Область II_a характеризовала формирование одной, а затем, по мере уменьшения Ro , двух вторичных спиралей, концы которых представляли вихри противоположного направления вращения (фиг. 2, а, б). Результатом взаимодействия двух спиралей было образование в центре сосуда крупномасштабной эллипсоидальной структуры (фиг. 2, в). Параметры зоны II_b определяли устойчивый эллипс с внутренней областью, свободной от визуализирующих частиц (фиг. 1, г; 2, г). На внешней его границе существовало интенсивное струйное течение, направленное против часовой стрелки. Для значений параметров зоны III возбуждались три спирали, результатом взаимодействия которых было формирование треугольника (фиг. 1, д, е; 2, д, е). Зоны IV, V, VI соответствовали существованию четырех, пяти и шести взаимодействовавших спиралей (фиг. 1, ж-м; 2, ж-м).

Анализ диаграммы показал, что одновременное изменение определяющих параметров (Ta, Ro) обуславливало два возможных качественно различных пути эволюции гидродинамической системы по волновым числам: первый, согласующийся с выводами линейной теории устойчивости, когда интенсификация среднего потока (рост Ta) при одновременном уменьшении Ro приводила к росту волнового числа (луч AO) на фиг. 3); и второй, когда при росте Ta и увеличении параметра относительного сдвига наблюдалось уменьшение n (луч OB) на фиг. 3). При фиксированном Ta волновое число определялось как $n = -28Ro + a$, где $a = 0,6Ta + 6,9$. Для неизменного Ro , $n = bTa$, где $b = 1,55 - 4Ro$. Нелинейное поведение системы - уменьшение волнового числа возмущений при интенсификации среднего движения - определялось ростом параметра относительного сдвига.

В ходе экспериментов были обнаружены режимы периодических перебросов системы по волновым числам при неизменных внешних параметрах в отсутствие вынуждающего воздействия. Так, точкам границы областей $II_b - III$ диаграммы устойчивости соответствовали режимы спонтанных перебросов системы от двух волн к трем и обратно при фиксированных внешних условиях. Период цикла составлял 51-54 с. Точки границы III-IV определяли периодические перебросы от трех волн к четырем и обратно с периодом 31-33 с (фиг. 4, а). Граница IV-V соответствовала перебросам по $n=4,5$ с периодом 20-25 с (фиг. 4, б). Для V-VI реализовывались

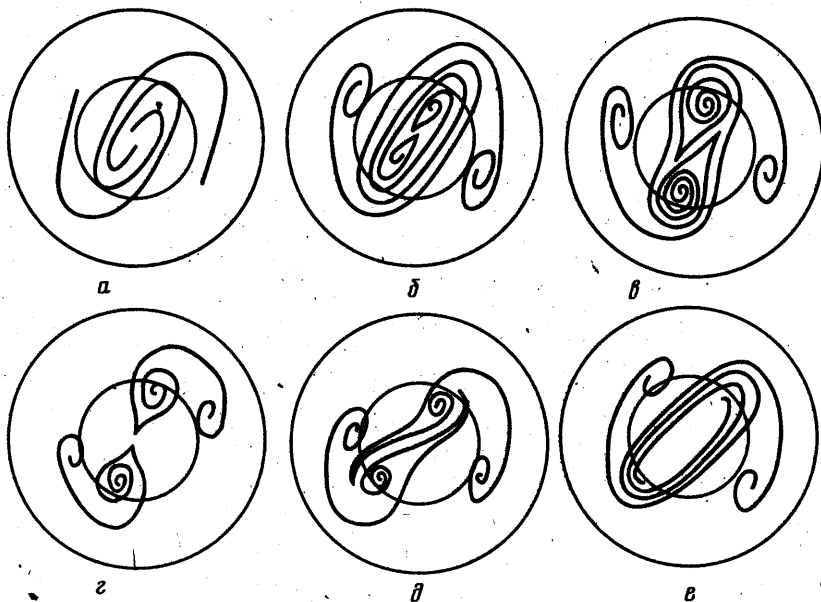


a

b

B

Фиг. 4



Фиг. 5

переходы по $n=5,6$ с периодом 16-19 с. Были также обнаружены точки фиксированных (Ta, Ro), для которых наблюдались периодические перебросы по трем и четырем волновым числам.

Возможность существования нескольких устойчивых состояний нелинейной системы при одних и тех же внешних условиях ранее рассматривалась в [12, 13]. В [14] экспериментально наблюдалось установление одного из двух квазистационарных состояний после потери устойчивости вращения. В настоящих экспериментах осуществлялись периодические перебросы по квазистационарным состояниям. Периоды циклов составляли десятки секунд и оставались практически неизменными. Сколь угодно долго, что позволяет говорить о существовании набора структурных состояний гидродинамической системы в диапазоне одного порядка изменения коэффициента турбулентного обмена.

В качестве возможного физического механизма наблюдавшегося явления можно предположить следующий. За время жизни системы n_1 происходит передача энергии мелкомасштабной турбулентности в крупномасштабное движение (накачка), следует переход к системе n_2 . В течение времени жизни n_2 полученный энергетический импульс расходуется на преодоление вязкого трения (сброс), осуществляется возврат к n_1 и т. д.

Для точек границы $\Pi_a - \Pi_b$ диаграммы устойчивости наблюдался цикл структурных переходов при неизменном n системы, схематически представленный на фиг. 5. На начальном этапе в пределах эллиптической ячейки циркуляции формировалась система двух вихрей, вращавшихся против часовой стрелки (фиг. 5, а, б). Внешняя граница эллипса деформировалась, образуя гантелеобразную структуру (фиг. 5, в). Далее происходило обособление вихрей, они расходились диаметрально от центра установки (фиг. 5, г). По прошествии 5-6 с вихри вновь сближались и, взаимодействуя, формировали сначала гантель, а затем эллиптическую ячейку циркуляции (фиг. 5, д, е). Период всего цикла составлял 66-68 с. Аналогично перебросам по волновым числам переходы осуществлялись при неизменных внешних параметрах в отсутствие вынуждающего воздействия.

Оценим результаты экспериментов с точки зрения задач геофизической гидродинамики. Многие природные динамические системы в широком диапазоне пространственно-временных масштабов относятся к разряду сдвиговых течений. Это циркуляция планетарного и синоптического масштабов, фронтальные течения, струи и т. д. Многообразие типов геофизических движений обуславливается реализацией различного рода неустойчивостей, в частности сдвиговой неустойчивости. Прослеживается качественное соответствие систем крупномасштабных волн в зоне полярного фронта, характеризующихся $n=2, 3, 4, 5, 6$, и лабораторных течений [15], что подтверждает гипотезу динамического механизма формирования стационарных крупномасштабных волн во фронтальных зонах природных конвективных сдвиговых систем. Переходы по волновым числам определяются параметрами интенсивности и сдвига скорости зональных потоков.

В ряде работ высказывается предположение, что наблюдаемая атмосферная изменчивость связана с существованием двух или более «погодных режимов», которые реализуются при одном и том же внешнем возбуждении. Каждый из режимов обладает собственным зонально-осредненным потоком, конфигурацией стационарной волны и распределением нестационарных возмущений. Чередующиеся изменения типа циркуляции могут происходить вследствие переходов между несколькими состояниями равновесия, существующими в нелинейной гидродинамической системе с фиксированным набором внешних параметров, что подтверждают результаты проведенных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hide R., Titman C. W.* Detached shear layers in a rotating fluid // *J. Fluid Mech.* 1967. V. 29. № 1. P. 39–60.
2. *Niino H., Misawa N.* An experimental and theoretical study of barotropic instability // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. № 12. P. 1992–2011.
3. *Довженко В. А., Новиков Ю. В., Обухов А. М.* Моделирование процесса генерации вихрей в аксиально-симметричном азимутальном поле МГД-методом // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1979. Т. 15. № 11. С. 1199–1202.
4. *Должанский Ф. В.* О генерации вихревых возмущений на фоне двухмерного течения со сдвигом, возбуждаемого в поле сил Кориолиса источниками и стоками массы // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1981. Т. 17. № 6. С. 563–573.
5. *Должанский Ф. В., Курганский М. В., Черноусько Ю. Л.* Лабораторное и теоретическое исследование баротропных волн Россби во вращающемся кольцевом канале // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1979. Т. 15. № 6. С. 597–608.
6. *Нездин М. В.* Солитоны Россби (Экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // *Успехи физ. наук.* 1986. Т. 150. № 1. С. 3–60.
7. *Лушин В. М., Ланно С. С.* Геогидравлическая модель: А. с. № 647572. СССР / Б. И. 1979. № 6.
8. *Ланно С. С., Гуслякова Е. В., Соловьев А. А.* Лабораторное моделирование вихрей с учетом широтного распределения параметра Кориолиса // *Гидрометеорологические закономерности формирования среднеширотных энергоактивных областей Мирового океана.* М.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 107–117.
9. *Brown G. L., Roshko A.* On density effects and large structure in turbulent mixing layers // *J. Fluid Mech.* 1974. V. 64. № 4. P. 775–816.
10. *Cantwell B. J.* Organized motion in turbulent flow // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1981. V. 13. P. 457–515.
11. *Рабинович М. И., Сушик М. М.* Когерентные структуры в турбулентных течениях // *Нелинейные волны: Самоорганизация.* М.: Наука, 1983. С. 56–85.
12. *Гледзер Е. Б., Должанский Ф. В., Обухов А. М.* Системы гидродинамического типа и их применение. М.: Наука, 1981. 366 с.
13. *Гледзер Е. Б., Должанский Ф. В., Обухов А. М., Пономарев В. М.* Экспериментальное и теоретическое исследование устойчивости движения жидкости внутри эллиптического цилиндра // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1975. Т. 11. № 10. С. 981–992.
14. *Гледзер Е. Б., Макаров А. Л., Пономарев В. М.* Об устойчивости эллиптического вращения жидкости в поле сил Кориолиса // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1980. Т. 16. № 4. С. 417–420.
15. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 615 с.

Москва

Поступила в редакцию
4.III.1991